

明 細 書

発明の名称：水素燃焼炉、及び水素燃焼炉の運転方法

技術分野

[0001] 本発明は、水素燃焼炉、及び水素燃焼炉の運転方法に関する。

背景技術

[0002] カーボンニュートラルの要請の実現に向けて、CO₂ガス排出量の削減のための技術開発に関心が高まっている。金属やガラスなどの製造過程で用いられる、所謂工業炉では、大量のCO₂ガスを排出しており、その削減は重要な課題と認識されている。

[0003] 従来から、CO₂ガス削減技術や省エネ技術の有効な手段として、酸素燃焼が知られている。酸素燃焼とは、酸化剤として酸素または空気に酸素を富化した酸素富化空気を用いる燃焼方法であり、工業炉において広く用いられている。酸素燃焼では、燃焼に寄与しない酸化剤中の窒素量が減るため、火炎温度の上昇や排ガス熱損の削減といったメリットが得られ、結果として熱効率の向上による燃料使用量の削減が可能となる。すなわち、炭化水素燃料の使用量を削減できるため、CO₂ガス排出量の削減に大きく寄与する。

[0004] 従来の省エネ技術に加えて、炭化水素燃料の水素エネルギーへの転換が期待されている。特許文献1には、工業的な燃焼炉において、燃料として水素ガスを使用する燃焼バーナ（水素バーナ）を用いた技術が開示されている。

先行技術文献

特許文献

[0005] 特許文献1：特開2020-094740号公報

発明の概要

発明が解決しようとする課題

[0006] ところで、燃焼バーナと燃焼炉とを用いる炉内燃焼では、投入したエネルギーが、炉内で有効に利用される熱量と、排ガスとして系外へ排出されて損失となる熱量とに分類される。例えば、酸素比1.05、排ガス温度1300

℃とした場合、燃料として炭化水素燃料（例えば、メタン）を用いた場合、及び水素を用いた場合のいずれも、酸化剤中の酸素濃度が高いほど排ガス熱損失の割合が小さい（すなわち、炉内で有効に利用される熱量の割合が高く、加熱効率が高いことを意味する）ことが知られている。加熱効率が高いほど、炉を所定温度まで昇温、及び維持するために必要な量が少なくてすむため、燃料として水素を用いる水素バーナの仕様に際して、酸素燃焼を適用することで、燃料コストの削減が期待できる。

[0007] しかしながら、水素燃焼では、炭化水素燃料に比較して火炎温度が高いため、サーマル NO_x を主とする NO_x 排出量が増加すると一般的に言われている。酸素燃焼でも同様に、火炎温度が高温となることから、特に酸素富化の状態では、 NO_x 排出量が増加することが知られている。したがって、水素燃焼と酸素燃焼とを組合せることで、 NO_x 排出量が更に増加することが懸念される。

[0008] 本発明は、上記事情に鑑みてなされたものであって、 NO_x 排出量の低減が可能な水素燃焼炉、及び水素燃焼炉の運転方法を提供することを課題とする。

課題を解決するための手段

[0009] 上記課題を解決するため、本発明は以下の構成を備える。

[1] バーナを有する燃焼炉本体と、
前記バーナに水素を供給する第1経路と、
前記バーナに酸素を含む支燃性ガスを供給する第2経路と、
前記燃焼炉本体から排ガスを導出する第3経路と、
前記第1経路に位置し、前記水素の供給量を調整する第1制御装置と、
前記第2経路に位置し、前記支燃性ガスの供給量を調整する第2制御装置と、
前記第3経路に位置し、前記排ガス中の成分を分析するガス分析装置と、
前記第1制御装置、前記第2制御装置、及び前記ガス分析装置との間で電気信号を送受信する制御装置と、を備え、

前記制御装置が、前記ガス分析装置から得られる分析値から、前記燃焼炉本体において前記水素が不完全燃焼するように、前記第1制御装置と前記第2制御装置とを制御する、水素燃焼炉。

〔2〕 前記第3経路に位置し、前記排ガスから水分を除去する水分除去装置をさらに備える、〔1〕に記載の水素燃焼炉。

〔3〕 前記水分除去装置が、前記ガス分析装置の一次側に位置する、〔1〕又は〔2〕に記載の水素燃焼炉。

〔4〕 前記第3経路と接続され、燃料の少なくとも一部として前記排ガスを用いる燃焼装置をさらに備える、〔1〕乃至〔3〕のいずれかに記載の水素燃焼炉。

〔5〕 前記燃焼装置が、前記第1経路及び前記第2経路の少なくとも一方又は両方に亘って設けられる熱交換器である、〔1〕乃至〔4〕のいずれかに記載の水素燃焼炉。

〔6〕 前記燃焼炉本体が、内側の空間に収容した被加熱物を加熱する加熱炉である、〔1〕乃至〔5〕のいずれかに記載の水素燃焼炉。

〔7〕 水素と酸素を含む支燃性ガスを燃焼させるバーナを有する燃焼炉本体を備える水素燃焼炉の運転方法であって、

前記燃焼炉本体において、前記水素を不完全燃焼させる、水素燃焼炉の運転方法。

〔8〕 前記燃焼炉本体において、酸素比が0.98以下で不完全燃焼させる、〔7〕に記載の水素燃焼炉の運転方法。

〔9〕 酸素濃度が90体積%以上の前記支燃性ガスを用いる、〔7〕又は〔8〕に記載の水素燃焼炉の運転方法。

発明の効果

〔0010〕 本発明の水素燃焼炉、及び水素燃焼炉の運転方法によれば、NO_x排出量の低減が可能である。

図面の簡単な説明

〔0011〕 〔図1〕本実施形態に適用可能な水素燃焼炉の構成の一例を示す系統図である。

[図2]本実施形態に適用可能な水素燃焼炉の構成の他の例を示す系統図である。

[図3]本発明の検証試験の結果を示す図である。

[図4]本発明の検証試験の結果を示す図である。

[図5]本発明の検証試験の結果を示す図である。

発明を実施するための形態

[0012] 以下、本発明を適用した一実施形態である水素燃焼炉、及び水素燃焼炉の運転方法について、図面を参照しながら詳細に説明する。なお、以下の説明で用いる図面は、特徴をわかりやすくするために、便宜上特徴となる部分を拡大して示している場合があり、各構成要素の寸法比率などが実際と同じであるとは限らない。

[0013] 本明細書における用語の意味及び定義は、以下のとおりである。

「加熱効率」とは、投入したエネルギーに対する、炉の加熱に利用されたエネルギーの比率である。炉の加熱に利用されたエネルギーは、排ガスが炉外へ持ち去る熱量（排ガス熱損）を計算し、投入したエネルギーから排ガス損失を差し引いて計算する。

「酸素比」とは、燃料が完全燃焼するのに必要な酸素量に対する、支燃性ガス中に含まれる酸素量の比率をいう。

「～」で表される数値範囲は、～の前後の数値を下限値及び上限値とする数値範囲を意味する。

[0014] <水素燃焼炉>

まず、本発明を適用した一実施形態である水素燃焼炉の構成について、説明する。図1は、本実施形態の水素燃焼炉の構成を示す系統図である。なお、図1中に示す実線の矢印は、ガス（気体）流れの方向を示し、点線の矢印は、電気信号の送信方向を示す。

図1に示すように、本実施形態の水素燃焼炉1は、燃焼炉本体2、バーナ3、水分除去装置4、ガス分析装置5、制御装置6、流量制御弁（第1制御装置）7、流量制御弁（第2制御装置）8、燃焼器（燃焼装置）9、及び経

路 L 1 ～ L 6 を備えて、概略構成されている。

- [0015] 本実施形態の水素燃焼炉 1 は、燃料である水素と、支燃性ガス中に含まれる酸素とを、バーナ 3 に供給し、燃焼炉本体 2 内で燃焼（炉内燃焼）させる際、低酸素比で水素を燃焼（すなわち、不完全燃焼）させることで NO_x 排出量を低減させるものである。
- [0016] 燃焼炉本体 2 は、内側に空間を有し、バーナ 3 の火炎を炉内燃焼させることができるものであれば、特に限定されない。燃焼炉本体 2 としては、内側の空間に収容した被加熱物（図示略）を加熱する加熱炉を用いることができる。具体的な構成としては、従来から公知の構成（例えば、特開 2020-148426、特開 2021-042102 等の特許文献に記載された構成）を適用することができる。
- [0017] 本実施形態の水素燃焼炉 1 を加熱炉として用いる場合、被加熱物としては、例えば、鋼材、熔融した金属やガラスが挙げられる。本実施形態の水素燃焼炉 1 では、水素ガスを燃料として用いるため、不完全燃焼時の排ガスとして H_2 、 H_2O 、 N_2 が主成分となり、炭化水素燃料を用いた場合に発生する、一酸化炭素（ CO ）、二酸化炭素（ CO_2 ）、および煤が排出されない。したがって、被加熱物の品質に悪影響を与えるおそれがないために好ましい。
- [0018] バーナ 3 は、火炎の噴射口が燃焼炉本体 2 の内側の空間と連通するように、燃焼炉本体 2 に接続されている。バーナ 3 は、燃料である水素と、支燃性ガス中に含まれる酸素とを燃焼炉本体 2 内で燃焼（炉内燃焼）させるものであれば、特に限定されない。具体的な構成としては、従来から公知の構成（例えば、特開平 09-243028、特開 2013-079753、特開 2021-124212 等の特許文献に記載された構成）を適用することができる。
- [0019] 経路（第 1 経路）L 1 は、図示略の水素ガス供給源とバーナ 3 との間に位置する。経路 L 1 は、水素ガス供給源からバーナ 3 に、燃料として水素ガス（ H_2 ）を供給するガス供給ラインである。経路 L 1 には、流量制御弁（第 1 制御装置）7 が設けられている。

- [0020] 経路（第2経路）L2は、図示略の支燃性ガス供給源とバーナ3との間に位置する。経路L2は、支燃性ガス供給源からバーナ3に、支燃性ガスを供給するガス供給ラインである。経路L2には、流量制御弁（第2制御装置）8が設けられている。
- [0021] 流量制御弁7及び流量制御弁8は、制御装置6からの制御信号により、あるいは手動によって、ガス供給ラインを流れるガスの供給量をそれぞれ調整する制御装置である。流量制御弁7及び流量制御弁8としては、例えば、コントロールバルブ、マスフローコントローラ、手動ニードルバルブが挙げられる。
- [0022] 支燃性ガスは、酸素を含むガス（酸化剤）であり、酸素ガス（ O_2 ）、空気に酸素を富化した酸素富化空気、又は空気を用いることができる。支燃性ガス（酸化剤）中の酸素濃度としては、21体積%以上が好ましく、40体積%以上がより好ましく、90体積%以上がさらに好ましい。支燃性ガス中の酸素濃度が高いほど、支燃性ガス中の窒素濃度が低くなるため、水素燃焼炉1において不完全燃焼させた際に NO_x 排出量を低減できる。また、支燃性ガス中の酸素濃度が90体積%以上であると、排ガス中の水素濃度が高くなるため、排ガス中に含まれる未反応の水素ガスを燃料として有効に利用できる。
- [0023] 経路（第3経路）L3は、燃焼炉本体2と燃焼器9との間に位置する。経路L3は、燃焼炉本体2から導出された排ガス中の水素ガスを、燃料の一部として燃焼器9に供給するガス供給ラインである。経路L3には、水分除去装置4とガス分析装置5とが一次側からこの順に設けられている。
- [0024] 水分除去装置4は、経路L3において、ガス分析装置5の一次側に位置する。水分除去装置4は、経路L3を流通する排ガス中から水分（ H_2O ）を除去する。また、水分除去装置4には、経路L4が接続されており、排ガス中から除去された水分を系外に排出する。水分除去装置4は、混合ガス中から水分を除去できるものであれば、特に限定されない。水分除去装置4としては、例えば、ミストセパレータ、水洗バブラ、チラーが挙げられる。

- [0025] ガス分析装置 5 は、経路 L 3 において、水分除去装置 4 の二次側に位置する。ガス分析装置 5 は、燃焼炉本体 2 から経路 L 3 に導出され、水分除去装置 4 により水分が除去された排ガス中の成分を分析する分析計を有する装置である。ガス分析装置 5 は、燃焼炉本体 2 において不完全燃焼されていることが確認できる 1 以上の分析計を有する。すなわち、ガス分析装置 5 は、排ガス中に水素が含まれているかどうかを確認するための水素分析計、及び、排ガス中に酸素が含まれていないかどうかを確認するための酸素分析計のうち少なくとも一方を有する。また、ガス分析装置 5 は、経路 L 3 に導出される排ガス中の成分のうち、窒素、 NO_x 、及び水分を検出可能な 1 以上の分析計を有していてもよい。
- [0026] 燃焼器（燃焼装置） 9 は、燃料の少なくとも一部として、燃焼炉本体 2 から導出される排ガス中に含まれる未反応の水素ガスを用いる燃焼装置である。燃焼器 9 は、排ガス中に含まれる水素ガスを燃料として用いることが可能なものであれば、特に限定されない。燃焼器 9 としては、例えば、ボイラ、他の燃焼炉が挙げられる。また、燃焼器 9 としては、燃焼炉本体 2 から導出される排ガス中に含まれる NO_x が増加しないものがより好ましい。
- [0027] 燃焼器 9 には、経路 L 3、経路 L 5、及び経路 L 6 が接続されている。経路 L 5 は、燃焼器 9 に燃料や支燃性ガスを供給するガス供給ラインである。また、経路 L 6 は、燃焼器 9 から導出される排ガスを系外に排出するガス排出ラインである。
- [0028] 制御装置 6 は、流量制御弁（第 1 制御装置） 7、流量制御弁（第 2 制御装置） 8、及びガス分析装置 5 との間で、有線又は無線によって電気信号を送受信する。制御装置 6 は、ガス分析装置 5 から得られるガス分析の分析値から、燃焼炉本体 2 において水素が不完全燃焼するように、流量制御弁 7 と流量制御弁 8 とを制御する機能を有する。
- [0029] 制御装置 6 は、上述した機能を有するものであれば、特に限定されない。制御装置 6 としては、中央演算処理装置（CPU）と、メモリと、ハードディスクドライブとを備える構成としてもよい。なお、制御装置 6 は、流量制

御弁 7、流量制御弁 8、及びガス分析装置 5 とは独立して（別体として）設けてもよいし、流量制御弁 7、流量制御弁 8、及びガス分析装置 5 のいずれかに付属する形態として設けてもよい。

[0030] <水素燃焼炉の運転方法>

次に、本発明の一実施形態である水素燃焼炉の運転方法を説明する。

本実施形態の水素燃焼炉の運転方法は、水素と酸素を含む支燃性ガスとを燃焼させるバーナ 3 を有する燃焼炉本体 2 を備える水素燃焼炉 1 の運転方法である。

以下、本発明の一実施形態である水素燃焼炉の運転方法として、上述した水素燃焼炉 1 に、支燃性ガスとして酸素富化空気を用いた場合を一例として、具体的に説明する。

[0031] 先ず、図 1 に示す水素燃焼炉 1 において、経路 L 1 から水素ガス (H_2) を、経路 L 2 から支燃性ガスとして酸素富化空気 (N_2 、 O_2) を、それぞれバーナ 3 に供給し、燃焼炉本体 2 内にて炉内燃焼させる。本実施形態では、燃焼炉本体 2 において、水素を不完全燃焼させる。

燃焼炉本体 2 から経路 L 3 には、未反応の水素ガス (H_2)、窒素ガス (N_2)、水 (H_2O)、及び NO_x を含む混合ガスが排ガスとして導出される。

[0032] 次に、経路 L 3 に導出された排ガスは、水分除去装置 4 において水が除去される。ここで、水分除去装置 4 の二次側の経路 L 3 には、水素ガス (H_2)、窒素ガス (N_2)、及び NO_x を含む混合ガスが流通する。

[0033] 次に、ガス分析装置 5 にて、経路 L 3 に流通する混合ガス中のガス成分を分析する。具体的には、ガス分析装置 5 では、燃焼炉本体 2 において水素が不完全燃焼していること、すなわち、混合ガス中に水素ガスが含まれていること、混合ガス中に酸素ガスが含まれていないこと、を確認する。

[0034] なお、ガス分析装置 5 における分析結果は、電気信号を介して制御装置 6 に送信される。そして、混合ガス中に水素ガスが含まれていない場合、制御装置 6 は流量制御弁（第 1 制御装置） 7 に対して、開度を大きくする制御信号を送信する。これにより、経路 L 1 を介してバーナ 3 へ供給される水素ガ

スが増加する。

[0035] 一方、混合ガス中に酸素ガスが含まれている場合、制御装置 6 は流量制御弁（第 2 制御装置）8 に対して、開度を小さくする制御信号を送信する。これにより、経路 L 2 を介してバーナ 3 へ供給される支燃性ガスが減少する。

[0036] ここで、本実施形態の水素燃焼炉の運転方法では、制御装置 6 により、燃焼炉本体 2 において、酸素比は 1 未満となるように制御する。酸素比の上限値を 1 未満とすることで、不完全燃焼の状態が得られるため、排ガス中の NOx 排出量を抑制することができる。なお、酸素比の上限値は、0.98 以下とすることが好ましく、0.97 以下とすることがより好ましい。酸素比を 0.98 以下とすることで、更なる NOx 排出量の削減効果が得られる。

また、酸素比の下限值は、0.90 以上とすることが好ましく、0.95 以上とすることがより好ましい。酸素比を 0.90 以上とすることで、加熱効率の低下を抑えつつ、NOx 排出量を効果的に削減できる。

[0037] 次に、ガス分析装置 5 によってガス成分を分析した後、経路 L 3 を流通する混合ガスを燃焼器 9 に導入する。

燃焼器 9 では、燃焼炉本体 2 での不完全燃焼により、混合ガス中に含まれる水素を燃料の一部として用いる。これにより、本実施形態の水素燃焼炉 1 の運転方法によれば、燃焼器 9 を含む水素燃焼炉 1 全体として、加熱効率の低下を抑制できる。

[0038] なお、燃焼器 9 において、経路 L 5 を介して通常の燃料、及び支燃性ガスを供給して燃焼している場合、既存の燃料に対して微量の水素量を供給するのであれば、燃焼条件は大きく変わらないため、NOx 排出量は低いまま維持され、経路 L 6 より排出される。

本実施形態の水素燃焼炉 1 の運転方法によれば、NOx 排出量を増加させることなく、燃焼炉本体 2 から導出される排気ガスを再利用することができる。

[0039] 以上説明したように、本実施形態の水素燃焼炉 1、及びその運転方法によ

れば、バーナ 3 の燃料として水素ガスを用い、燃焼炉本体 2 内で炉内燃焼させる際、低酸素比で水素を燃焼（すなわち、不完全燃焼）させるため、燃焼炉本体 2 から導出される排ガス中の NO_x 排出量を低減できる。

[0040] また、本実施形態の水素燃焼炉 1、及びその運転方法によれば、燃焼炉本体 2 での水素ガスの不完全燃焼により、混合ガス中に含まれる水素を燃焼器 9 の燃料の一部として用いるため、燃焼器 9 を含む水素燃焼炉 1 全体として、加熱効率の低下を抑制できる。

[0041] なお、本発明の技術範囲は上記実施の形態に限定されるものではなく、本発明の趣旨を逸脱しない範囲において種々の変更を加えることが可能である。上述した水素燃焼炉 1、及びその運転方法によれば、燃焼装置として燃焼器 9 を用いる構成を一例として説明したが、これに限定されない。例えば、燃焼装置として、燃焼器 9 に替えて熱交換器 29（下記実施形態を参照）を用いる構成としてもよい。

[0042] 図 2 は、本実施形態に適用可能な水素燃焼炉の構成の他の例を示す系統図である。

図 2 に示すように、他の実施形態の水素燃焼炉 21 は、燃焼装置として、燃焼器 9 に替えて熱交換器 29 を用いるとともに、経路 L 5 及び経路 L 6 に替えて経路 L 25 及び経路 L 26 を用いる点で、上述した水素燃焼炉 1 と構成が異なっている。したがって、水素燃焼炉 21 では、水素燃焼炉 1 の同じ構成については同一の符号を付して、その説明を省略する。

[0043] 熱交換器（燃焼装置）29 は、経路 L 1 及び経路 L 2 に亘って設けられており、燃料の少なくとも一部として、燃焼炉本体 2 から導出される排ガス中に含まれる未反応の水素ガスを用いる。

[0044] 熱交換器 29 には、経路 L 3、経路 L 25、及び経路 L 26 が接続されている。経路 L 25 は、熱交換器 29 に支燃性ガス（図中では、酸素ガス（ O_2 ）を例示）を供給するガス供給ラインである。また、経路 L 26 は、熱交換器 29 から導出される排ガスを系外に排出するガス排出ラインである。

[0045] また、水素燃焼炉 21 の運転方法では、ガス分析装置 5 によってガス成分

を分析した後、経路L 3を流通する混合ガスを熱交換器2 9に導入する。

熱交換器2 9では、燃焼炉本体2での不完全燃焼により、混合ガス中に含まれる水素を燃料として用いる。これにより、熱交換器2 9によって水素ガスを燃焼した熱によって、経路L 1を流れる水素ガス、及び経路L 2を流れる支燃性ガスをそれぞれ加熱（予熱）できる。

[0046] 以上説明したように、水素燃焼炉2 1及びその運転方法によれば、熱交換器2 9の効率の分だけ熱回収が可能となる。そして、熱交換器2 9の温度を1 0 0 0℃以下などに制御すれば、排ガス中のNO_x排出量を増加させることなく、かつ熱交換器2 9を含む水素燃焼炉2 1全体として、加熱効率の向上できる。

[0047] なお、上述した水素燃焼炉2 1では、熱交換器2 9が経路L 1及び経路L 2に亘って設けられた構成を一例として説明したが、これに限定されない。熱交換器2 9は、経路L 1及び経路L 2の少なくとも一方に亘って設けられる構成であってもよい。

実施例

[0048] 以下、本発明の効果を検証試験によって説明する。なお、本発明は、以下の検証試験の内容によって限定されるものではない。

[0049] <検証試験1>

検証試験1では、図1に示す水素燃焼炉1を用い、バーナ3の燃料として水素ガスを用いる場合、すなわち、水素燃焼時において、酸素比とNO_x排出濃度との関係性を検証した。

[シミュレーション条件]

(1) シミュレーションソフト（計算ソフト）：Chemikin Pro
：Ansys社製

(2) 燃料ガス：水素

(3) 支燃性ガス：酸素、または酸素富化空気

(4) 反応モデル：GRI Mech 3.0 http://www.me.berkeley.edu/gri_mech

[0050] 図3は、水素燃焼時の酸素比とNO_x排出濃度との関係性を示す図であり

、（Ａ）支燃性ガス中の酸素濃度が９０体積％の場合、（Ｂ）支燃性ガス中の酸素濃度が４０体積％の場合、（Ｃ）支燃性ガス中の酸素濃度が２１体積％の場合をそれぞれ示す。

図３（Ａ）～（Ｃ）において、横軸はいずれも酸素比（Oxygen ratio[-]）を示し、縦軸はいずれも NO_x 排出濃度（ $\text{NO}_x[\text{ppm-wet}]$ ）を示す。また、図３（Ａ）～（Ｃ）において、いずれも燃焼炉本体２内の炉内温度が、１３０℃、１４００℃、１５００℃、１６００℃の場合について、確認した。

なお、 NO_x 排出濃度は、燃焼炉本体２から導出される水蒸気（ H_2O ）を含む排ガス中の NO_x 濃度である。

[0051] 図３（Ａ）～（Ｃ）に示すように、横軸の酸素比が１未満の時に不完全燃焼の状態となるが、不完全燃焼時には、いずれも NO_x の排出濃度は劇的に減少し、０に漸近することが確認できた。

[0052] したがって、 NO_x の排出濃度の低減の観点から、支燃性ガス中の酸素濃度によらず、いずれも酸素比の上限値は０．９８以下が好ましく、０．９７以下がより好ましいことが確認できた。

[0053] ＜検証試験２＞

検証試験２では、図１に示す水素燃焼炉１を用い、バーナ３の燃料として水素ガスを用いた水素燃焼時において、酸素比と加熱効率との関係性を検証した。

[0054] 図４は、水素燃焼時の酸素比と加熱効率との関係性を示す図であり、（Ａ）支燃性ガス中の酸素濃度が９０体積％の場合、（Ｂ）支燃性ガス中の酸素濃度が４０体積％の場合、（Ｃ）支燃性ガス中の酸素濃度が２１体積％の場合をそれぞれ示す。

図４（Ａ）～（Ｃ）において、横軸はいずれも酸素比（Oxygen ratio[-]）を示し、縦軸はいずれも加熱効率（Heat Efficiency[%]）を示す。また、図４（Ａ）～（Ｃ）において、いずれも燃焼炉本体２内の炉内温度が、１３０℃、１４００℃、１５００℃、１６００℃の場合について、確認した。

なお「加熱効率」とは、投入したエネルギーに対する、炉の加熱に利用され

たエネルギーの比率である。炉の加熱に利用されたエネルギーは、排ガスが炉外へ持ち去る熱量（排ガス熱損）を計算し、投入したエネルギーから排ガス損失を差し引いて計算する。

[0055] 図4（A）～（C）に示すように、支燃性ガス中の酸素濃度によらず、いずれも酸素比が1のときに加熱効率は極大となり、酸素比が1からの差が大きいほどに加熱効率が低下することが確認できた。

通常、バーナの燃焼では不完全燃焼を起こさないように酸素比が1以上となるように、バーナへの酸素の供給は過剰となるように運用されることが一般的であるが、不完全燃焼となるように酸素比を大きく下げた場合には、酸素比が1以上の領域と比較して明らかに加熱効率が低いことが確認できた。

[0056] したがって、加熱効率の維持の観点から、支燃性ガス中の酸素濃度によらず、いずれも酸素比の下限値は0.95以上とすることが好ましいことを確認できた。

[0057] <検証試験3>

検証試験3では、図1に示す水素燃焼炉1を用い、バーナ3の燃料として水素ガスを用いた水素燃焼時において、酸素比と排ガス中に含まれる水素濃度との関係性を検証した。

[0058] 図5は、水素燃焼時の酸素比と排ガス中に含まれる水素濃度との関係性を示す図であり、（A）支燃性ガス中の酸素濃度が90体積%の場合、（B）支燃性ガス中の酸素濃度が40体積%の場合、（C）支燃性ガス中の酸素濃度が21体積%の場合をそれぞれ示す。

図5（A）～（C）において、横軸はいずれも酸素比（Oxygen ratio[-]）を示し、縦軸はいずれも水素濃度（H₂[vol% dry]）を示す。また、図5（A）～（C）において、いずれも燃焼炉本体2内の炉内温度が、1300℃、1400℃、1500℃、1600℃の場合について、確認した。

なお、水素濃度は、燃焼炉本体2から導出される水蒸気（H₂O）を水分除去装置4によって除去したドライガス中の水素濃度である。

[0059] 図5（A）～（C）に示すように、横軸の酸素比が1未満であり、酸素比

の値が小さいほど、未燃のまま排出される水素が増加するため、排ガス中の水素濃度も増加することを確認できた。

[0060] したがって、排ガス中の水素の再利用の観点から、支燃性ガス中の酸素濃度によらず、いずれも酸素比の値が小さいほど、排ガス中の水素濃度が高くなり、燃焼させることが容易となるため、他の燃焼装置における燃料としての再利用が可能であることが示唆された。

[0061] 図5（A）～（C）に示すように、酸素比が1未満であり、支燃性ガス中の酸素濃度が高いほど、未燃のまま排出される水素が増加するため、排ガス中の水素濃度も増加することを確認できた。

[0062] したがって、排ガス中の水素の再利用の観点から、支燃性ガス中の酸素濃度が高いほど、酸素比が1未満における排ガス中の水素濃度が高くなり、燃焼させることが容易となるため、他の燃焼装置における燃料としての再利用が可能であることが示唆された。

符号の説明

- [0063] 1, 2 1 水素燃焼炉
- 2 燃焼炉本体
 - 3 バーナ
 - 4 水分除去装置
 - 5 ガス分析装置
 - 6 制御装置
 - 7 流量制御弁（第1制御装置）
 - 8 流量制御弁（第2制御装置）
 - 9 燃焼器（燃焼装置）
 - 2 9 熱交換器（燃焼装置）
 - L 1 経路（第1経路）
 - L 2 経路（第2経路）
 - L 3 経路（第3経路）

請求の範囲

- [請求項1] バーナを有する燃烧炉本体と、
 前記バーナに水素を供給する第1経路と、
 前記バーナに酸素を含む支燃性ガスを供給する第2経路と、
 前記燃烧炉本体から排ガスを導出する第3経路と、
 前記第1経路に位置し、前記水素の供給量を調整する第1制御装置と、
 前記第2経路に位置し、前記支燃性ガスの供給量を調整する第2制御装置と、
 前記第3経路に位置し、前記排ガス中の成分を分析するガス分析装置と、
 前記第1制御装置、前記第2制御装置、及び前記ガス分析装置との間で電気信号を送受信する制御装置と、を備え、
 前記制御装置が、前記ガス分析装置から得られる分析値から、前記燃烧炉本体において前記水素が不完全燃烧するように、前記第1制御装置と前記第2制御装置とを制御する、水素燃烧炉。
- [請求項2] 前記第3経路に位置し、前記排ガスから水分を除去する水分除去装置をさらに備える、請求項1に記載の水素燃烧炉。
- [請求項3] 前記水分除去装置が、前記ガス分析装置の一次側に位置する、請求項2に記載の水素燃烧炉。
- [請求項4] 前記第3経路と接続され、燃料の少なくとも一部として前記排ガスを用いる燃烧装置をさらに備える、請求項1に記載の水素燃烧炉。
- [請求項5] 前記燃烧装置が、前記第1経路及び前記第2経路の少なくとも一方又は両方に亘って設けられる熱交換器である、請求項4に記載の水素燃烧炉。
- [請求項6] 前記燃烧炉本体が、内側の空間に収容した被加熱物を加熱する加熱炉である、請求項1乃至5のいずれか一項に記載の水素燃烧炉。
- [請求項7] 水素と酸素を含む支燃性ガスとを燃烧させるバーナを有する燃烧炉

本体を備える水素燃焼炉の運転方法であって、

前記燃焼炉本体において、前記水素を不完全燃焼させる、水素燃焼炉の運転方法。

[請求項8] 前記燃焼炉本体において、酸素比が0.98以下で不完全燃焼させる、請求項7に記載の水素燃焼炉の運転方法。

[請求項9] 酸素濃度が90体積%以上の前記支燃性ガスを用いる、請求項7又は8に記載の水素燃焼炉の運転方法。